干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

新疆典型盐渍土微波介电特性响应分析与建模

赵 爽[1,2,3]， 丁建丽[1,2,3]， 韩礼敬[1,2,3]， 黄 帅[4]， 葛翔宇[1,2,3]

（1. 新疆大学地理与遥感科学学院，新疆 乌鲁木齐 830046；2. 新疆绿洲生态自治区重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830046；3. 智慧城市与环境建模自治区普通高校重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830046；4. 聊城大学地理与环境学院，山东 聊城 252000）

摘 要：土壤盐渍化对区域经济和生态可持续发展产生负面影响。微波介电常数是微波遥感探测土壤的关键因素，然而介电常数与盐分的关系仍不清晰。为分析盐分类型及含盐量对土壤介电常数的影响，在0.3~20.0 GHz频率下，测量了新疆典型的2种盐渍土类型（硫酸盐–氯化物型：Na_2SO_4-NaCl；氯化物–硫酸盐型：$NaCl-Na_2SO_4$）的介电常数，探讨含水量、含盐量、盐分类型及质地对土壤介电特性的影响。结果表明：（1）含盐量对湿润土壤、干燥粉壤土的复介电常数实部（ε'）和虚部（ε''）均产生影响。（2）对于同等级的2种湿润盐渍土在0.3 GHz频率下，整体上$\varepsilon''_{Na_2SO_4-NaCl} > \varepsilon''_{NaCl-Na_2SO_4}$。（3）虚部的电模量（$M''$）与含盐量的关系更紧密，且0.3~5.0 GHz是重要的频率范围。研究结果可为复杂下垫面下土壤盐渍化的微波遥感监测提供科学支持。

关 键 词：微波介电常数；土壤盐渍化；机器学习；微波遥感
文章编号：

土壤盐渍化是造成干旱、半干旱地区土地退化的主要形式之一，直接造成作物产量损失18%~43%[1-2]，严重阻碍区域经济和生态可持续发展。据估计，到2050年全世界土壤盐渍化将持续加剧，超过一半的耕地可能被盐渍化[3]。目前，我国盐渍土壤的分布面积居世界首位[4]，同时，位于西北的新疆由于独特的气候条件，约31%的耕地受到盐渍化的威胁，盐渍土种类多且分布广泛[5]。因此，找到一种快速有效监测土壤盐渍化时空分布的手段，对提供合理决策，确保可持续的土壤管理及防止土壤退化有着重要的意义。

与传统光学遥感相比，微波遥感受下垫面信息影响较小，在监测沙漠地区、地形复杂地区和沿海地区的盐渍化情况更有优势[6-7]。雷达影像有效后向散射系数与土壤复介电常数密切相关[8]，是微波遥感监测土壤属性的关键。土壤作为一种有损介质，复介电常数实部与电磁波在土壤表面的散射和传输有关，虚部与电磁波在土壤中的衰减有关。目前，利用微波遥感监测土壤水分已进行了大量的研究[9-10]，学者已提出了描述介电常数与土壤水分关系的模型[11-13]，然而，它们缺乏考虑土壤盐分对介电常数的影响。

对于盐渍化土壤，盐分对介电常数的影响可能是显著的，研究指出在微波遥感（L波段）反演土壤水分时，若忽略盐渍化区域的影响，精度会降低[14]。不仅如此，直接建立雷达（SAR）影像后向散射系数与土壤盐分的关系模型仍存在困难[15]。因此，通过土壤介电模型反演土壤盐渍化是必要的方法。邵芸等[16]分析了盐渍土（NaCl）的介电特性，结果表明盐分对频率（f）小于5.0 GHz的虚部影响较大，虚部与Radarsat影像后向散射系数的相关系数为0.66，表明了微波遥感监测土壤盐渍化的潜力。此外，自然状态土壤中盐分类型非单一盐分，大多研究只考虑了一类盐分对土壤介电特性的影响，不同盐渍土

收稿日期：2022-01-10； **修订日期**：2022-03-13
基金项目：国家自然科学基金项目（41961059）；新疆维吾尔自治区自然科学基金重点项目（2021D01D06）；山东省自然科学基金（ZR2021QD112）资助
作者简介：赵爽（1997-），女，硕士研究生，主要从事干旱区遥感与GIS应用研究. E-mail: zhaoshuang@stu.xju.edu.cn
通讯作者：丁建丽（1974-），男，博士，教授，主要从事干旱区遥感与GIS应用研究. E-mail: watarid@xju.edu.cn

类型对介电特性影响的研究较少。

解决上述问题的关键是厘清含盐量、盐分类型及土壤质地与土壤介电特性的响应关系，有助于机理验证和盐渍土壤介电模型的发展，为反演土壤盐分提供理论支持和科学参考。本文的目的如下：(1) 配置不同质量含水量，含盐量及盐分类型的土样，分析0.3~20.0 GHz频率范围内土壤的微波介电特性；(2) 探究土壤复介电常数的实部（ε'），虚部（ε''），电模量（M' 和 M''）与盐分的响应关系；(3) 利用随机森林(Random forest，RF)，建立盐渍土介电模型，并探讨对盐分敏感的频率波段。

1　研究区概况

为探究土壤质地对介电常数的影响，本文在2个区域采样(图1)，以获取不同质地的土样。渭–库绿洲位于渭干河与库车河之间(82°10′~83°50′E，41°06′~41°40′N)，属于大陆性暖温带干旱气候，海拔892~1100 m，多年平均气温10.5~14.4 ℃，多年平均降水量55.5 mm，蒸降比约为43:1。该区土壤类型主要为潮土和草甸土，沼泽土、盐土等也分布较为广泛。研究区地下水位较高，在水盐运移的过程中，盐分不断向地表移动，盐碱化面积不断扩大[17]，绿洲的生态环境和农业生产受到严重威胁，盐分主要由氯化物和硫酸盐组成[18]

艾比湖湿地自然保护区位于博尔塔拉蒙古自治州境内(79°53′~85°02′E，43°38′~45°52′N)，艾比湖绿洲的地理及生态特征是一个复杂的山地、绿洲及沙漠生态系统，多年平均蒸发量3627 mm，是降水量的40倍[19]。土壤类型主要为钙层土、高山土和漠土。近年来随着人口剧增、土地资源的开发，造成草场退化、土地沙漠化，土壤盐渍化问题日益严重[20]，该区盐渍土类型主要以氯化物型为主，伴有硫酸盐–氯化物型及氯化物–硫酸盐型[21]。

2　研究方法

2.1　实验方法

本研究选用3种质地的土壤，分别标为1号、2号和3号。在实验室完成预处理：自然风干、研磨、过筛(2 mm)，分别用于测定土壤基础的物理属性，并配置不同含水含盐量的土样。

1号土壤采集自渭–库绿洲，土壤采集深度为0~30 cm，采样时间为2019年10月。2号与3号土壤采集自艾比湖地区，采样时间为2019年8月。利用德国WTW公司生产的Cond 7310电导率测定仪测定土壤含盐量(1:5土水法)，土壤浸提液电导率与盐分关系显著，Salt= 127.45×k −0.4953，其中k是电导率(10^4 μS·cm^{-1})，Salt为土壤盐度(10^{-3})[22]，3种土壤的含盐量在3.01~4.50 g·kg^{-1}之间。使用美国MICRO-TRAC公司制造的S3500型激光粒度仪测定土壤粒径分布，根据美国农业部制定的土壤粒级划分标准，测得3种土壤的质地，如表1所示。

为探究盐分类型对土壤介电特性的影响，3种质地的土壤预处理后，放入105 ℃的干燥箱中36 h去除水分，以配制不同含水含盐量的土样。研究表明渭–库和艾比湖地区盐类为混合物[17-18,21]，根据《中国土壤普查技术》标准[23]，盐渍土盐分组成类型由水溶性盐类的阴离子毫克当量比值来划分，盐渍化分级见表2。本研究使用NaCl和Na_2SO_4进行配

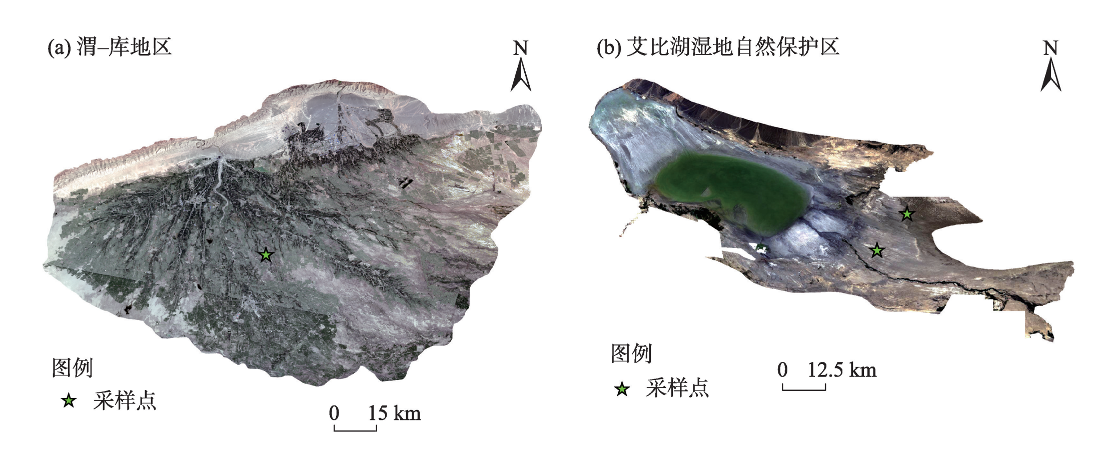


图1　研究区和采样点分布

Fig. 1　Distributions of the study area and sampling sites

表1　3种土壤的物理属性

Tab. 1　Physical properties of the three kind of soil

土壤编号	含盐量/g·kg⁻¹	质量分数/%			质地
		黏粒(<0.002 mm)	粉粒(0.05~0.002 mm)	砂粒(0.005~2 mm)	
1号	4.50	1.97	72.83	25.20	粉壤土
2号	3.01	0.29	26.40	73.31	壤砂土
3号	3.90	2.03	46.88	51.09	砂壤土

表2　土壤盐渍化分级

Tab. 2　Soil salinization classification

盐渍化等级	0~30 cm土壤平均含盐量/%		耐盐性较强作物的生长情况
	硫酸盐-氯化物	氯化物-硫酸盐	
极轻盐渍化	0.5~0.7	0.6~0.8	正常生长,不受抑制
轻度盐渍化	0.7~0.9	0.8~1.0	生长一般或稍受抑制
中度盐渍化	0.9~1.3	1.0~1.5	生长受抑制,明显减产
强度盐渍化	1.3~1.6	1.5~2.0	严重受抑制,缺苗、减产
盐土	>1.6	>2.0	死亡无收

置,硫酸盐-氯化物(Na_2SO_4-NaCl)含盐量依次为0.6%、0.8%、1.1%、1.5%和1.8%;氯化物-硫酸盐($NaCl-Na_2SO_4$)依次为0.7%、0.9%、1.3%、1.8%和2.2%。8个质量含水量(本研究简称含水量)等级依次为0、5%、10%、15%、20%、25%、30%和35%。配置步骤如下:(1)计算并称取不同含盐量等级所需盐分;(2)计算并称取不同含水量等级所需水分;(3)把盐分和水分混合均匀,充分溶解后的盐溶液喷洒至土样。制备好的样品置于铝盒密封保存48 h,以确保充分混合,用于复介电常数测量。1号、2号和3号土壤均配制成8个含水量等级、2种盐分类型各5个盐分等级的80个土样,总计配制土样240个。

2.2　土壤介电常数测量方法

在本研究中,采用Keysight PNA-N5232A微波网络分析仪及85070探头测量土壤的复介电常数(实部 ε' 和虚部 ε'')。测量频率范围为0.3~20.0 GHz,采样点数为500。微波网络分析仪预热2 h后,用空气、短路(校准件)和去离子水在室温25 ℃下校准探头。

为确保测量结果的准确性,每次测量前都需要完成校准步骤。测量时将探头紧压在土样表面。复介电常数的电模量[24]常用来描述分析被测介质的弛豫现象,定义为复介电常数的倒数:

$$M^* = \frac{1}{\varepsilon' + j\varepsilon''} \tag{1}$$

$$M^* = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} + j\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} \tag{2}$$

式中:M^* 为复介电常数的电模量;j 为虚部的单位,$j = \sqrt{-1}$。

实部电模量和虚部的电模量分别用 M'、M'' 表示,公式如下:

$$M^* = M' + jM'' \tag{3}$$

$$M' = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} \tag{4}$$

$$M'' = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} \tag{5}$$

2.3　模型方法

随机森林(RF),是一种基于集成学习的方法,它将多棵决策树集成,能较好地进行分类和预测[25-26]。它的处理步骤如下:(1)假设原始数据集包含N个样本,每个样本有T个特征属性。利用自助重采样法对原始数据集有放回的进行M轮随机抽样,未被抽取的b个数据称为袋外数据。(2)利用M个新样本数据集训练决策树。每棵树随机选取t个待选特征属性($t<T$),根据Gini系数最小原则从t中选择局部最优的分裂节点,得到M棵决策树,即RF。(3)利用生成的RF对未知样本进行预测,预测值为所有回归树预测值的平均值,可表示为:

$$\bar{h}(x) = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M} h\left(X;\theta_i\right) \tag{6}$$

式中:$\bar{h}(x)$ 为预测值;M为回归树数量;θ_i 为独立分

布的随机向量；X 为输入矩阵；$h(X;\theta_i)$ 为每棵树的输出值。

此外，RF通过计算袋外数据的内部误差，可实现对输入的变量进行重要性评估[27]。根据袋外数据计算每个决策树的袋外误差 $\{E_1, E_2, \cdots, E_b\}$，随后，随机改变袋外数据的某个特征属性 X_t 的值，再次计算每个决策树的袋外误差 $\{E'_1, E'_2, \cdots, E'_b\}$。最后，根据 X_t 造成的袋外误差变化大小来表示该变量的重要程度，特征 X_t 的重要性 $\bar{I}(X_t)$ 可表示为：

$$\bar{I}(X_t) = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}(E'_b - E_b) \quad (7)$$

式中：M 为决策树数量；E_b 和 E'_b 为改变特征属性 X_t 前后的袋外误差。

RF建模过程在R-3.5.3平台上实现，0.3~20.0 GHz频率范围对应的介电常数 ε''、M' 和 M'' 的值作为自变量（500个），土壤含盐量作为因变量进行建模。

2.4 模型评价指标

按照土壤质地种类可获得3个数据集，均包含80个样本，每个数据集以7:3的比例随机分为两部分：校准数据集 n_{Cal}=56，验证数据集 n_{Val}=24。研究应用3个指标评价模型预测性能：决定系数（R^2）、均方根误差（RMSE）和四分位数间隔（$Q3-Q1$）与RMSE的比值（RPIQ）。一般情况下，土壤理化数据呈现非正态分布，RPIQ较残留预测偏差（RPD）评价更加客观[28]。通常来说，好的模型具有较高的 R^2 和RPIQ，和较低的RMSE。3个评价指标公式如下：

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - \bar{P})^2}{\sum_{i=1}^{n}(A_i - \bar{A})^2} \quad (8)$$

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P_i - A_i)^2} \quad (9)$$

$$\mathrm{RPIQ} = \frac{Q3 - Q1}{\mathrm{RMSE}} \quad (10)$$

式中：n 为样本数量；A_i 为第 i 个样本的实测值；$\bar{A}$ 为所有样本实测值的平均值；P_i 为第 i 个样本的预测值；$\bar{P}$ 为所有样本预测值的平均值；$Q3$ 为样本观测值第三四分位数；$Q1$ 为第一四分位数。

3 结果与分析

通过Keysight PNA-N5232A微波网络分析仪测量土壤复介电常数，取3次测量的平均值作为结果，且计算复介电常数的电模量，因此4种介电常数用于介电特性分析。

3.1 含水量对介电常数的响应分析

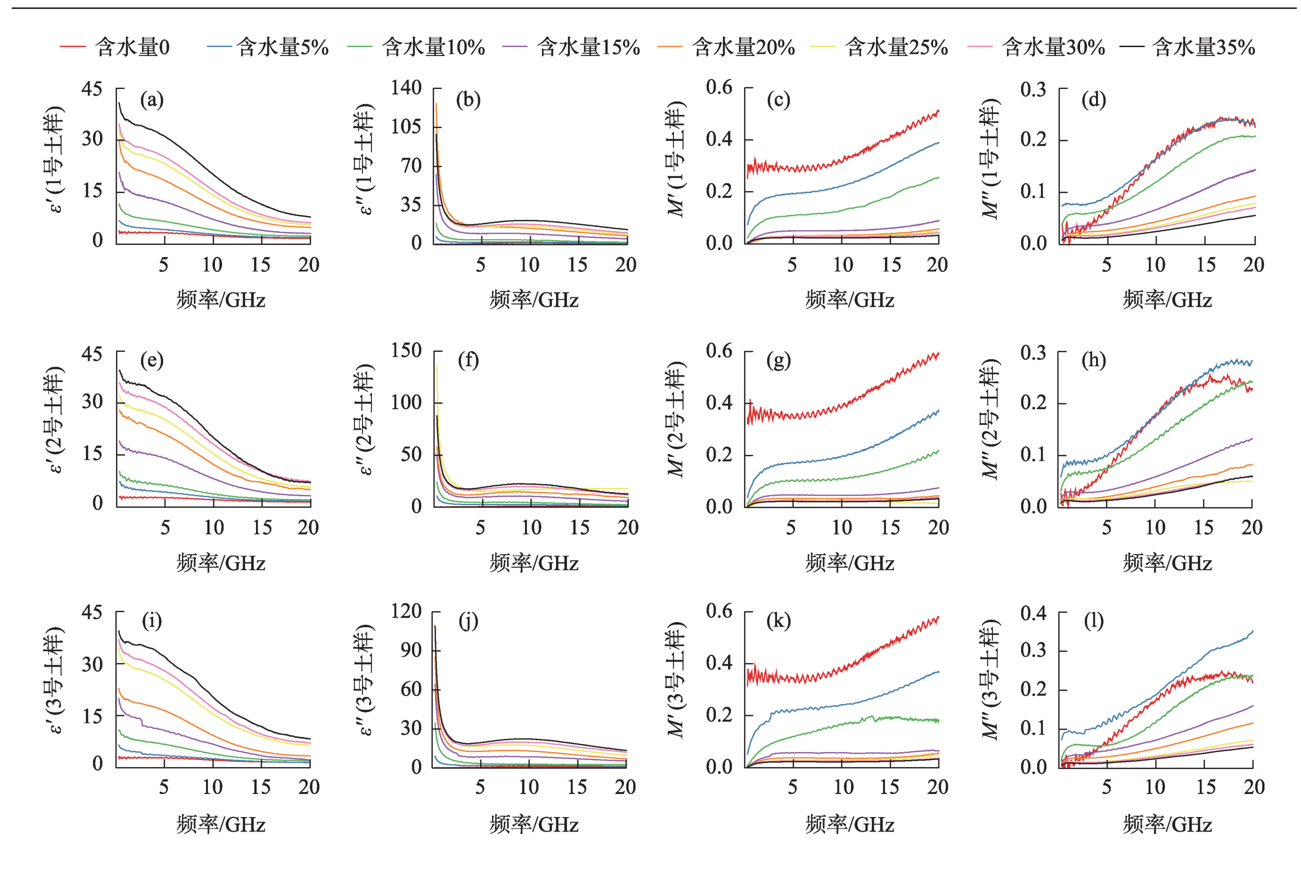
图2显示了相同含盐量下（以0.7% $NaCl-Na_2SO_4$ 为例）不同含水量土样的介电常数。结果表明，4种介电常数都受到含水量的影响。含水量为0土样的介电常数很小，随着含水量的增加介电常数增大。主要原因是在低含水量土壤中，水的主要形式是结合水，离子运动性弱，介电常数主要受土壤粒子影响，导致介电常数较小；当含水量增加，土壤中自由水增加，离子的运动性增强，自由水的极化作用与布朗运动加剧，介电常数随之增大[29]。在整个频率范围内，ε' 和 ε'' 均随着频率的增加而减小，对于一个固定的频率，含水量越高，ε' 和 ε'' 值就越大，含水量对 ε' 的影响大于 ε''。总体上，M' 和 M'' 均随着频率的增加而增加，固定频率下 M' 和 M'' 随着含水量的增加而减小。在其他含盐量条件下，4种介电常数受水分影响表现的趋势一致。

3.2 土壤盐分对介电特性的响应分析

在含水量和质地一定的条件下，土壤介电常数受到含盐量和盐分类型2个因素的影响。

3.2.1 含盐量对介电特性的响应分析 当土壤含水量为0时，含盐量对不同质地土样的影响具有差异性。含盐量对1号土样（粉壤土）的复介电常数影响最显著（图3a~b），5个等级盐渍土 ε' 和 ε'' 平均值分别相差0.34和0.19；2号（壤砂土）、3号（砂壤土）土样受盐分影响较小（图3e、f、i和j），ε' 平均值分别相差0.08和0.14，ε'' 分别为0.03和0.08。以1号土样5个 $NaCl-Na_2SO_4$ 盐分等级的介电常数为例（图3a~d），ε' 随着频率的增加而减小，在一定频率下 ε' 随含盐量而降低。ε'' 在0.3~10.0 GHz左右随着频率的增加而增大，随后 ε'' 随着频率和含盐量的增加而降低。由于复介电常数的电模量（M' 和 M''）同时受 ε' 和 ε'' 影响，在表现土壤属性上会稍有不同，固定频率下 M' 随着盐分的增加而增高。

相同含水量下（以25%为例）不同 $NaCl-Na_2SO_4$ 含盐量的介电常数见图4。在不区分质地的前提下，含盐量对于4种介电常数均产生影响，其中 ε'' 受盐分影响最大（0.3 GHz），在其他含水量情况下也表现出相似的规律。以1号土样为例（图4a~d），ε' 和 ε'' 均随着频率的增加而减小，在一



注：ε' 和 ε'' 分别为复介电常数实部和虚部；M' 和 M'' 分别为实部和虚部的电模量。下同。

图2　介电常数与含水量的关系

Fig. 2　Relationship between dielectric constant and water content

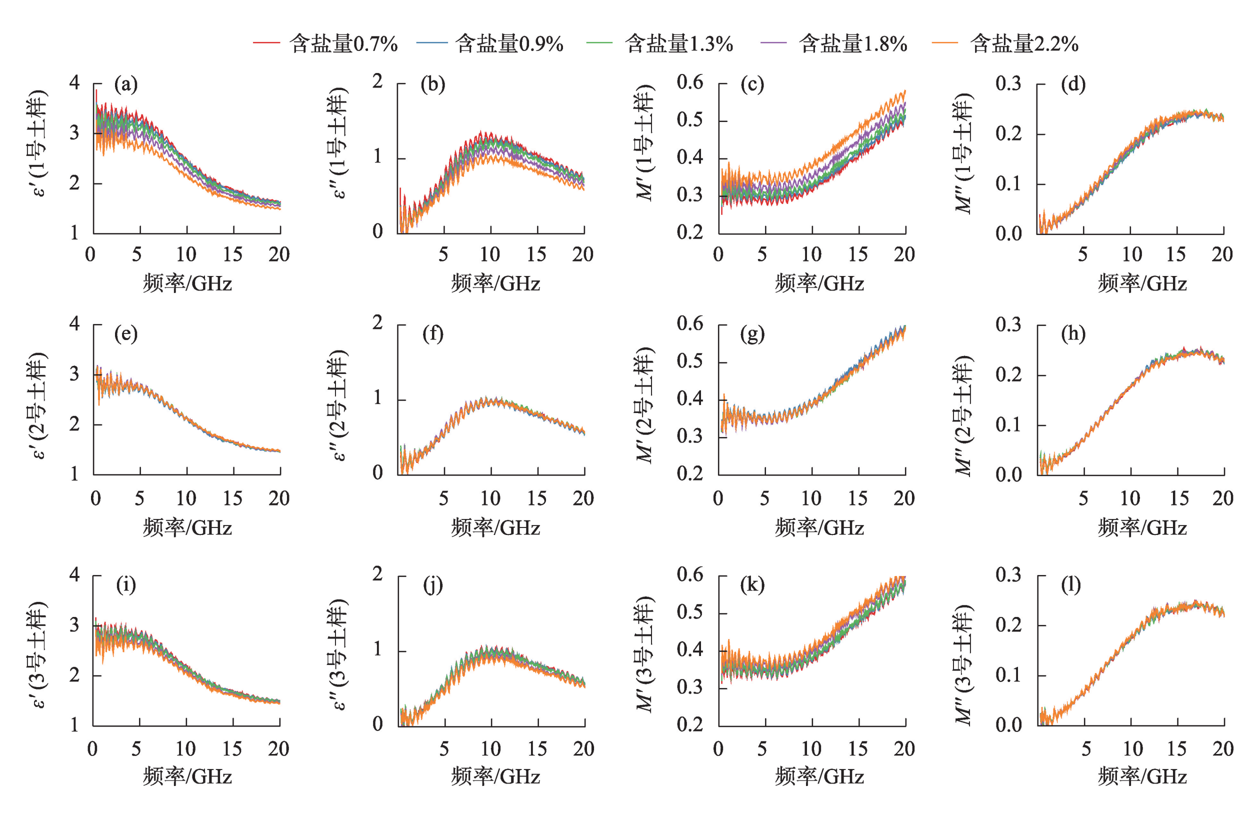


图3　介电常数与含盐量（$NaCl-Na_2SO_4$）的关系（含水量0）

Fig. 3　Relationship between dielectric constant and salt content ($NaCl-Na_2SO_4$, mass water content of 0)

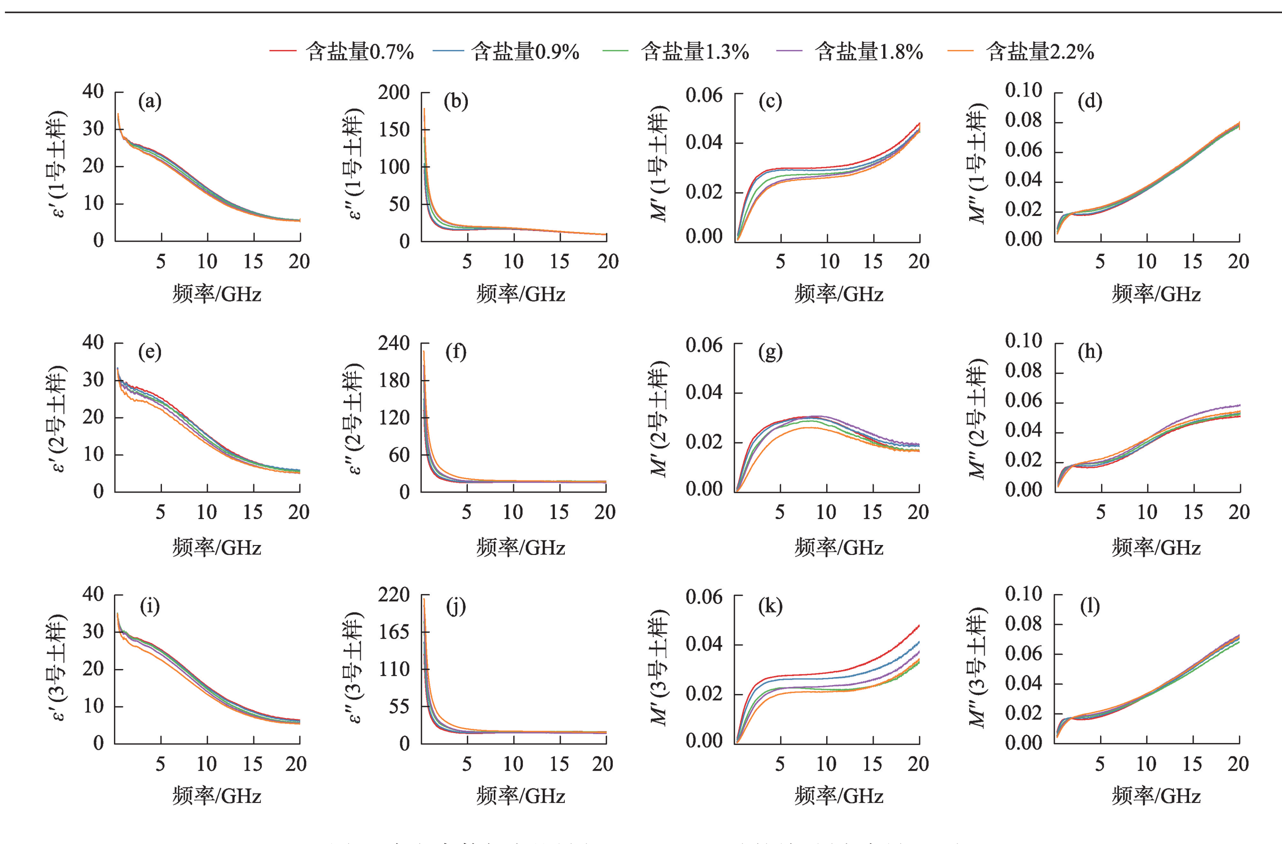


图4　介电常数与含盐量($NaCl-Na_2SO_4$)的关系(含水量25%)

Fig. 4　Relationship between dielectric constant and salt content ($NaCl-Na_2SO_4$, water content of 25%)

定频率下随着盐含量从0.7%增加至2.2%,0.3 GHz频率下 ε'' 增大了82.8,在5.0 GHz左右迅速下降。整体上,M' 能较好反映5个等级盐渍土的介电特性;M'' 在 f<1.8 GHz左右与盐分呈负相关性关系,当 f>1.8 GHz左右时转为正相关性关系(图5a)。

3.2.2　盐分类型对介电特性的响应分析　为比较盐分类型对土壤介电特性的影响,仍以25%含水量为例,不同 Na_2SO_4-NaCl 含盐量的介电常数见图6。

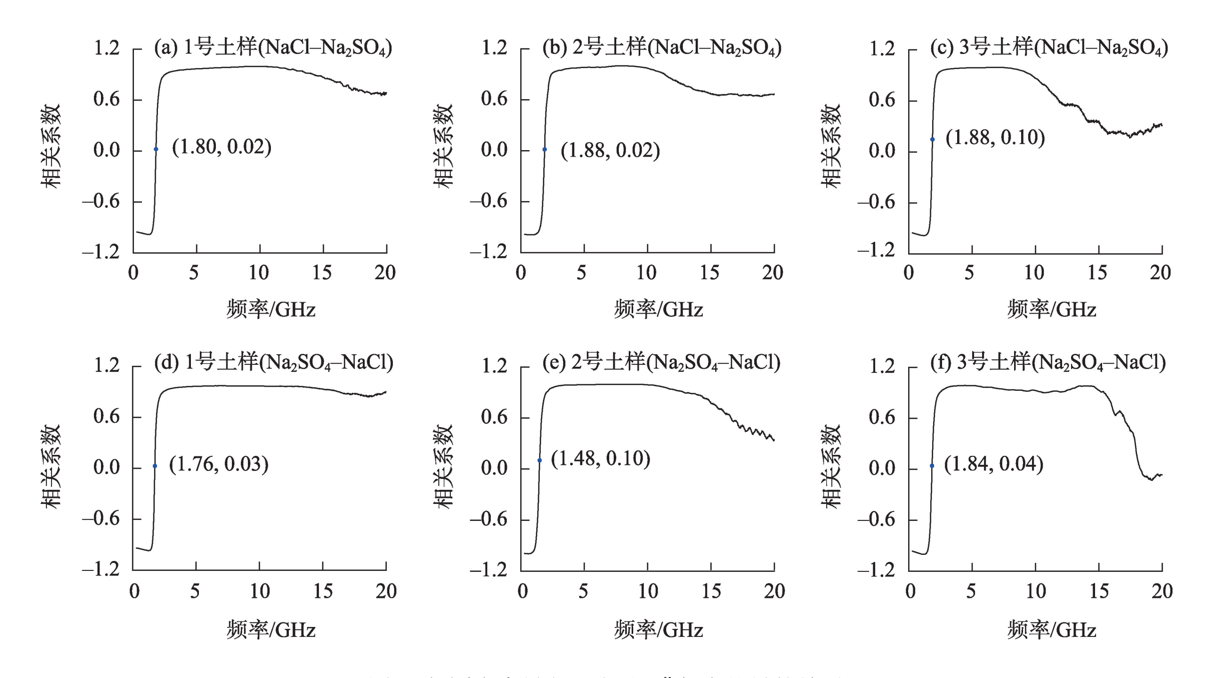


图5　相同含水量(25%)下 M'' 与含盐量的关系

Fig. 5　Relationship between M'' and salt content under the same water content (25%)

总体上2种类型盐渍土的 ε'、M' 和 M'' 呈现相似的规律(图4),0.3 GHz频率下 ε'' 的差别较明显,在其他含水量下也表现出上述趋势。为清晰的说明盐分类型对 ε'' 的影响,图7为0.3 GHz频率下,相同盐渍化等级下2种盐渍土的 ε'',整体上 $\varepsilon''_{Na_2SO_4-NaCl} > \varepsilon''_{NaCl-Na_2SO_4}$,这表明盐分类型对 ε'' 的影响明显,同等

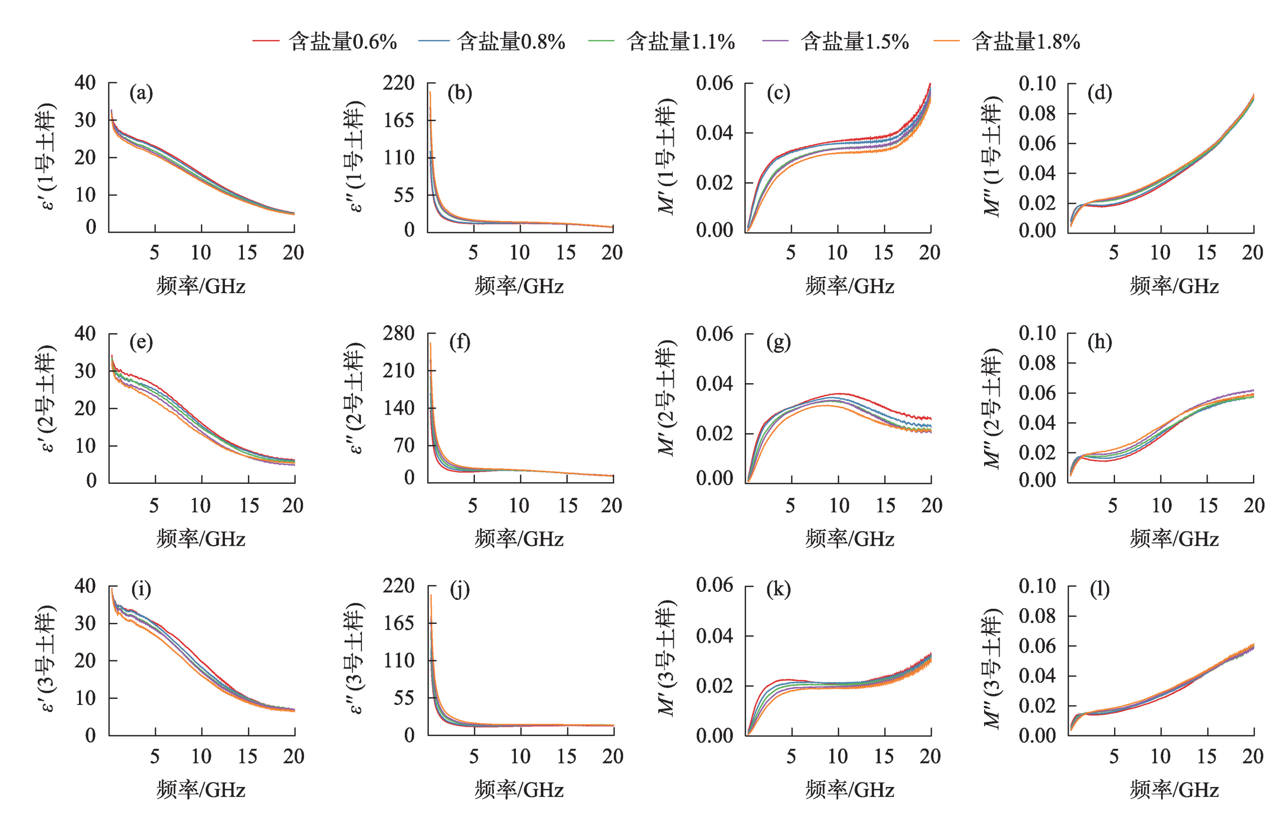


图6 介电常数与含盐量(Na_2SO_4-NaCl)的关系(含水量25%)

Fig. 6 Relationship between dielectric constant and salt content (Na_2SO_4-NaCl, water content of 25%)

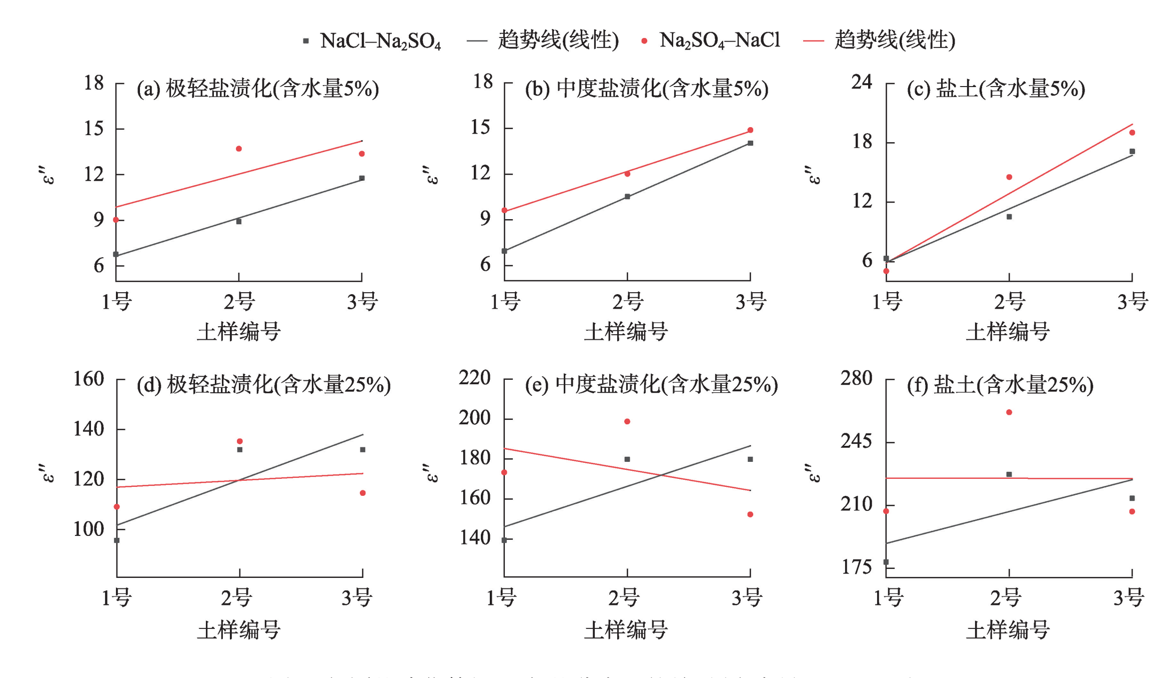


图7 相同盐渍化等级 ε'' 与盐分类型的关系(含水量5%和25%)

Fig. 7 Relationship between the same salinization grade ε'' and salt type (water content of 5% and 25%)

级的 Na_2SO_4－NaCl 盐渍土对 ε'' 的影响强于 NaCl－Na_2SO_4 盐渍土。M'' 在 f<1.76 GHz 左右与含盐量呈负相关性关系，随着频率的增加呈正相关性关系（图5d）。

3.3　质地对介电特性的响应分析

根据3.1、3.2节的分析，在同一含盐量下，3种质地不同含水量土样的介电常数之间无明显的差别（图2）。在同一含水量下，质地对不同含盐量土壤的介电常数影响较大。对于干燥的土壤，1号土样（粉壤土）不同含盐量的 ε' 与 ε'' 之间有明显的差别（图3）；对于湿润的盐渍土，在0.3 GHz 频率下3种质地的 ε'' 具有较明显的差异，同等级盐渍化下3种质地土壤的 ε'' 值总体上表现出：$\varepsilon_{壤砂土}''>\varepsilon_{粉壤土}''$，砂壤土的规律性较弱（图7）。

3.4　土壤盐分估算模型构建

基于3.2节分析不同含水含盐土壤的介电特性，水分对 ε' 的影响是显著的，含水量一定时，含盐量对4种介电常数均产生影响，其中对 ε'' 起决定性作用。为定量评估介电常数估算土壤盐分的有效性，利用RF算法分别使用3种质地的 ε''、M' 与 M'' 估算土壤盐分，结果见表3。介电常数 ε''、M' 与 M'' 预测土壤含盐量的效果依次提升，M'' 最佳（平均值 R_{Cal}^2=0.92，$RMSE_{Cal}$=0.18，R_{Val}^2=0.53，$RMSE_{Val}$=0.37，RPIQ=2.43），与 ε'' 相比，RPIQ提高了0.56。结果表明 M'' 能有效地预测土壤盐分。

4　讨　论

4.1　盐渍土类型对微波介电特性的影响

自然条件下，盐渍土中的盐分由不同盐类混合构成。胡庆荣等[16,30]使用单一盐（NaCl）探究不同体含水含盐土壤的微波介电特性，发现 ε'' 在低频范围（f<2.0 GHz）变化明显，在同频率、体积含水量条件下，含盐量越大，ε'' 的值越大，与本研究的结果一致。此外，本文通过探究2种盐渍土的微波介电特性，发现盐渍土种类差异表现在低频范围 ε''。对比同等级的盐渍土（盐土，含水量5%），在0.3 GHz 频率下，Na_2SO_4－NaCl 盐渍土（含盐量1.8%）ε'' 的值较 NaCl－Na_2SO_4 盐渍土（含盐量2.2%）大，表明 Na_2SO_4－NaCl 盐对 ε'' 产生的影响更大。这与丁艳玲等[31]研究结果相似，含盐量一定时，3种盐渍土 ε'' 值总体的特征是 $\varepsilon''_{NaCl}>\varepsilon''_{NaHCO_3}>\varepsilon''_{Na_2So_4}$。这是由于盐渍土的电导率除了受含盐量影响外，盐离子本身的特性也影响其与土壤粒子之间相互作用的关系，间接影响土壤电导率，即 ε''[32]。本研究使用NaCl和 Na_2SO_4 配制2类盐渍土，类型划分依据是 Cl^- 与 SO_4^{2-} 毫克当量比值，Na_2SO_4－NaCl 型盐渍土为 NaCl－Na_2SO_4 盐渍土的4倍以上，Na^+在土壤溶液中的影响强度最大[33]，造成 $\varepsilon''_{Na_2SO_4-NaCl}>\varepsilon''_{NaCl-Na_2SO_4}$。这2类盐渍土的虚部呈现的规律表明：$\varepsilon''$ 同时受到

表3　基于RF算法估算土壤盐分的模型结果

Tab. 3　Model results for estimating soil salinity based on RF algorithm

模型	介电常数	土壤编号	建模集		验证集		
			R_{Cal}^2	$RMSE_{Cal}$	R_{Val}^2	$RMSE_{Val}$	RPIQ
RF	ε''	1号	0.91	0.18	0.65	0.31	2.09
		2号	0.90	0.22	0.53	0.38	1.70
		3号	0.89	0.20	0.54	0.36	1.81
		平均值	0.90	0.20	0.57	0.35	1.87
	M'	1号	0.89	0.18	0.70	0.31	2.08
		2号	0.91	0.20	0.49	0.38	1.69
		3号	0.89	0.19	0.67	0.31	2.07
		平均值	0.90	0.19	0.62	0.33	1.95
	M''	1号	0.93	0.15	0.75	0.29	3.28
		2号	0.90	0.20	0.34	0.43	1.50
		3号	0.93	0.19	0.50	0.38	2.52
		平均值	0.92	0.18	0.53	0.37	2.43

注：RF为随机森林；R_{Cal}^2为建模集决定系数；$RMSE_{Cal}$为建模集均方根误差；R_{Val}^2为验证集决定系数；$RMSE_{Val}$为验证集均方根误差；RPIQ为四分位数间隔与RMSE的比值。

含盐量和盐分类型的影响，在以盐渍土介电模型为基础探测土壤含盐量时，忽略土壤中盐分类型可能会给模型估算带来误差。

4.2 质地对土壤微波介电特性的影响

质地对土壤介电特性的影响可能是显著的，尤其是质地较细的土壤。干燥的3种质地土样的 ε' 的差异主要在低频率范围(0.3 GHz)，其中含盐量对1号土样介电特性的影响较显著，对2号和3号不明显。ε' 随土壤含盐量的增加而降低，且在低频范围较为明显，这与Szypłowska等[34]研究结果一致，在数百MHz以下盐分和质地对 ε' 的影响较明显。ε'' 与含盐量呈负相关性关系，在高频率范围(f>10.0 GHz左右)较明显。这是由于土壤是一种有损介质，介电损耗来自土壤极化(水和基质)和土壤导电率，土壤极化在低频造成的损耗很小，在高频时较大[35]，当土壤含水量为0时，介电损耗来自土壤基质，由土壤本身的特性决定。然而，含盐量对2号和3号土样的介电常数未产生明显影响，这与质地有关。当土壤颗粒较细时，干燥土壤中的盐附在土壤颗粒表面，间接改变土壤中的空气比例[36]，导致介电常数同时受土壤机械组成和含盐量的影响。而本实验的2号和3号土样中砂粒含量较多(51.09%~73.31%)，土壤中的空气比例较大，盐分含量对空气比例未能产生较大影响。这表明，在干旱和半干旱区地表干燥的情况下，通过微波遥感监测颗粒较细土壤(砂粒含量较低)的盐渍化情况是有可能的。

本研究发现低频下不同质地之间，湿润盐渍土 ε'' 有一定的差距，在相同含水量下，$\varepsilon''_{粉壤土}$ 的值总是最小，且 $\varepsilon''_{壤砂土} > \varepsilon''_{粉壤土}$(图7)。这是由于粉壤土质地较2号和3号土样细。此外，由于质地的不同，配置相同含水量的土样时，实际含水量可能会有差异。许景辉等[37]研究发现质地影响土壤实际含水量，黏粒较高的湿润土壤的介电谱表现趋势基本相同，黏粒含量较少的黑土、砂壤土及石英砂的介电常数变化趋势大体一致，这是由于土壤黏粒含量通过影响土壤介电极化，进而影响土壤介电常数。

4.3 微波介电常数与土壤含盐量的关系

实验表明，在较低频率范围(f<5.0 GHz)，含盐量对湿润土壤 ε'' 有显著影响，ε' 在整个频率范围与含盐量呈反比，这与学者[1,38-39]研究结果一致。此外，湿润土壤的 M' 和 M'' 均能较好反映5个等级盐渍土的介电特性(图4和图6)。

基于RF构建介电常数土壤盐分估算模型中，介电常数(ε''、M' 和 M'')估算土壤盐分的效果差异明显。M'' 估算土壤盐分的性能较 ε'' 和 M' 高(RPIQ提高了0.48~0.56)，表明 M'' 可以更好的反映不同含盐量土壤的介电特性，进一步表明盐分同时影响 ε' 和 ε''，它们不是独立的关系[1,40]，构建盐渍土介电模型需考虑含盐量对 ε' 和 ε'' 的影响。图8为频率波段在建模过程相对重要性评估结果，基于3种介电常数建立的模型中，重要性高的频率范围均集中在低频(f<5.0 GHz)。结合建模结果，M'' 估算盐分效果最佳，这是因为该范围 M'' 对盐分的变化具有较强的响应。如图9所示，在f<5.0 GHz频率范围内，随着湿润土壤含盐量的增加，M'' 与含盐量在低频(约1.2~2.4 GHz)呈负相关性关系，随频率的增加转为正相关性关系。盐渍土介电模型的发展，可以考虑建立盐分和 ε'、ε'' 的关系，这为微波遥感高精度监测盐渍化提供了实验基础。

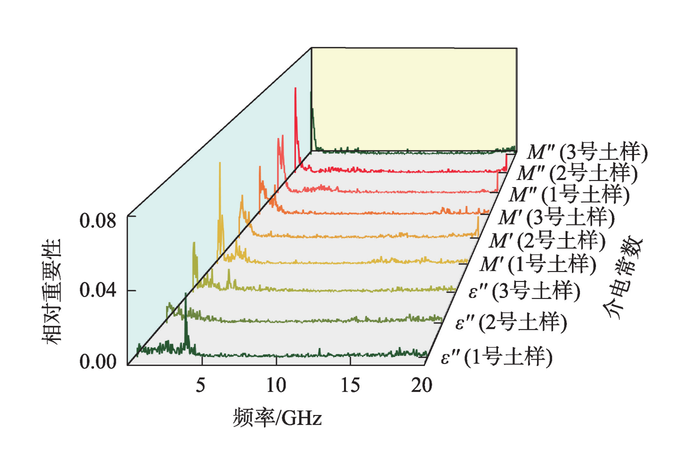


图8 介电常数重要的频率波段

Fig. 8 Important frequency bands of dielectric constant

5 结 论

本研究利用微波网络分析仪，测量不同含水量、含盐量及盐分类型土壤的介电常数，分别探讨了含水量、含盐量、盐分类型及质地对土壤介电特性的影响。通过RF算法构建土壤盐分估算模型，进一步确定与土壤盐分关系密切的介电常数及频率范围。主要结论如下：

(1) 复介电常数 ε' 和 ε'' 均受到含盐量的影响。土壤质量含水量为0时，粉壤土的 ε' 和 ε'' 在一定频率下随含盐量而降低；在一定的含水量情况下，3种质地土样的 ε' 随着含盐量的增加而降，ε''

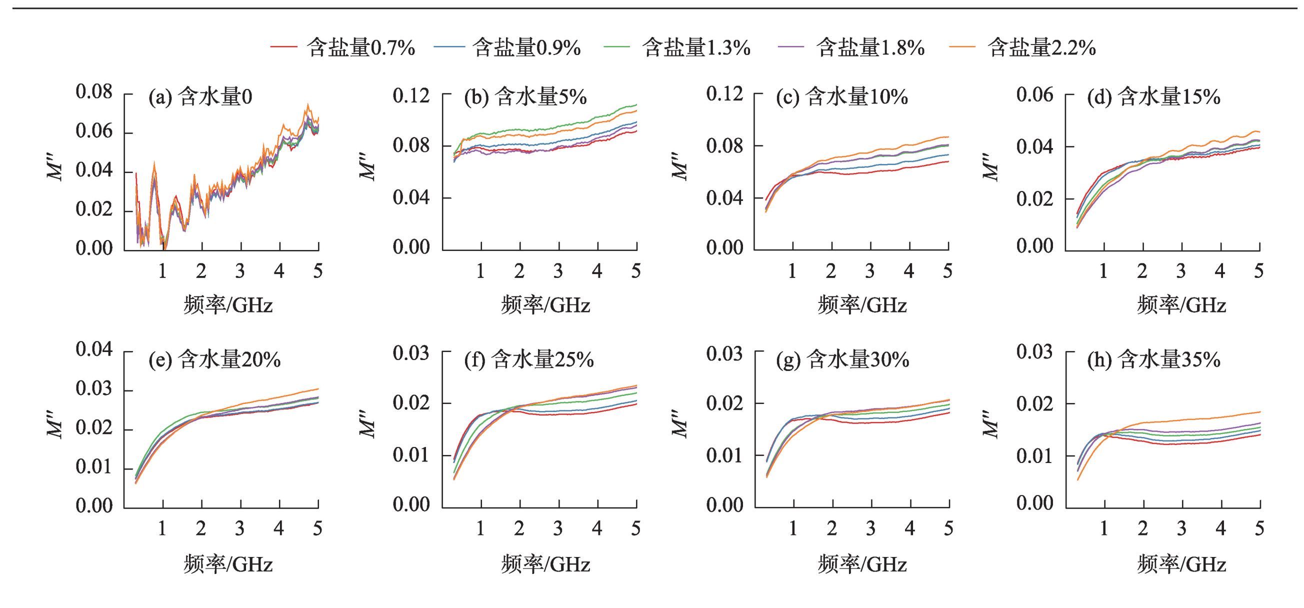


图9　1号土样 M'' 与土壤含盐量($NaCl-Na_2SO_4$)的关系

Fig. 9　Relationship between M'' and soil salt content ($NaCl-Na_2SO_4$) of soil sample No.1

随盐分的增加而增大，在0.3~5.0 GHz频率范围尤其明显。

(2) 对于同等级不同类型湿润盐渍土，在0.3 GHz 频率下，Na_2SO_4-NaCl 型盐渍土较 $NaCl-Na_2SO_4$ 型盐渍土对 ε'' 产生的影响更大，$\varepsilon''_{Na_2SO_4-NaCl} > \varepsilon''_{NaCl-Na_2SO_4}$。

(3) 质地影响土壤介电特性。对于干燥粉壤土的 ε' 和 ε'' 影响最显著，在一定频率下，ε' 和 ε'' 随着盐分的增加而减小；对于湿润的盐渍土，在0.3 GHz频率下3种质地的 ε'' 具有较明显的差异，ε'' 值总体上表现出：$\varepsilon''_{壤砂土} > \varepsilon''_{粉壤土}$。

(4) 基于 M'' 构建的RF土壤盐分估算模型效果最佳，M'' 对土壤盐分更敏感。此外，0.3~5.0 GHz是重要的频率范围。

因此，本文以实验为基础，结合机器学习方法分析重要频率范围的介电常数，为盐渍土介电模型的发展提供建议，对通过星载雷达传感器监测土壤盐渍化有重要意义。

参考文献(References)

[1] Lasne Y, Paillou P, Freeman A, et al. Effect of salinity on the dielectric properties of geological materials: Implication for soil moisture detection by means of radar remote sensing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(6): 1674–1688.

[2] 丁建丽, 姚远, 王飞. 干旱区土壤盐渍化特征空间建模[J]. 生态学报, 2014, 34(16): 4620–4631. [Ding Jianli, Yao Yuan, Wang Fei. Detecting soil salinization in arid regions using spectral feature space derived from remote sensing data[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(16): 4620–4631.]

[3] Machado R M A, Serralheiro R P. Soil salinity: Effect on vegetable crop growth. Management practices to prevent and mitigate soil salinization[J]. Horticulturae, 2017, 3(2): 30, doi: 10.3390/horticulturae3020030.

[4] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 837–845. [Yang Jingsong. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 837–845.]

[5] 田长彦, 周宏飞, 刘国庆. 21世纪新疆土壤盐渍化调控与农业持续发展研究建议[J]. 干旱区地理, 2000, 23(2): 177–181. [Tian Changyan, Zhou Hongfei, Liu Guoqing. The proposal on control of soil salinizing and agricultural sustaining developing 21th century in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2000, 23(2): 177–181.]

[6] 施建成, 杜阳, 杜今阳, 等. 微波遥感地表参数反演进展[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(6): 814–842. [Shi Jiancheng, Du Yang, Du Jinyang, et al. Progresses on microwave remote sensing of land surface parameters[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2012, 42(6): 814–842.]

[7] 张滢, 丁建丽, 周鹏. 干旱区土壤水分微波遥感反演算法综述[J]. 干旱区地理, 2011, 34(4): 671–678. [Zhang Ying, Ding Jianli, Zhou Peng. Model algorithm of soil moisture retrieval base on microwave remote sensing in arid regions[J]. Arid Land Geography, 2011, 34(4): 671–678.]

[8] 王学, 刘全明, 屈忠义, 等. 盐渍化土壤水分微波雷达反演与验证[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 108–114. [Wang Xue, Liu Quanming, Qu Zhongyi, et al. Inversion and verification of salinity soil moisture using microwave radar[J]. Transactions of the Chi-

nese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(11): 108–114.]

[9] 陈全, 周忠发, 王玲玉, 等. 基于多时相Sentinel-1 SAR数据的喀斯特石漠化区地表土壤水分反演研究[J]. 红外与毫米波学报, 2020, 39(5): 626–634. [Chen Quan, Zhou Zhongfa, Wang Lingyu, et al. Surface soil moisture retrieval using multi-temporal Sentinel-1 SAR data in karst rocky desertification area[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2020, 39(5): 626–634.]

[10] Zeng L, Shi Q Y, Guo K, et al. A three-variables cokriging method to estimate bare-surface soil moisture using multi-temporal, VV-polarization synthetic- aperture radar data[J]. Hydrogeology Journal, 2020, 28(6): 2129–2139.

[11] Wang J R, Schmugge T J. An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1980, GE- 18 (4): 288–295.

[12] Dobson M C, Ulaby F T, Hallikainen M T, et al. Microwave dielectric behavior of wet soil-part II: Dielectric mixing models[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1985, GE- 23 (1): 35–46.

[13] Mironov V L, Kosolapova L G, FominS V. Physically and mineralogically based spectroscopic dielectric model for moist soils[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47 (7): 2059–2070.

[14] Mccoll K A, Ryu D, Matic V, et al. Soil salinity impacts on L-band remote sensing of soil moisture[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012, 9(2): 262–266.

[15] Hoa P V, Giang N V, Binh N A, et al. Soil salinity mapping using SAR sentinel- 1 data and advanced machine learning algorithms: A case study at Ben Tre Province of the Mekong River Delta (Vietnam)[J]. Remote Sensing, 2019, 11(2): 128, doi: 10.3390/rs11020128.

[16] 邵芸, 吕远, 董庆, 等. 含水含盐土壤的微波介电特性分析研究[J]. 遥感学报, 2002, 6(6): 416–423. [Shao Yun, Lü Yuan, Dong Qing, et al. Study on soil microwave dielectric characteristic as salinity and water content[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2002, 6(6): 416–423.]

[17] Ding J L, Yang S T, Shi Q, et al. Using apparent electrical conductivity as indicator for investigating potential spatial variation of soil salinity across seven oases along Tarim River in southern Xinjiang, China[J]. Remote Sensing, 2020, 12(16): 2601, doi: 10.3390/rs12162601.

[18] Zhang F, Tiyip T, Ding J L, et al. Studies on the reflectance spectral features of saline soil along the middle reaches of Tarim River: A case study in Xinjiang Autonomous Region, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 69(8): 2743–2761.

[19] Han L J, Ding J L, Zhang J Y, et al. Precipitation events determine the spatiotemporal distribution of playa surface salinity in arid regions: Evidence from satellite data fused via the enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model[J]. Catena, 2021, 206: 105546, doi: 10.1016/j.catena.2021.105546.

[20] 曹肖奕, 丁建丽, 葛翔宇, 等. 基于不同卫星光谱模拟的土壤电导率估算研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43(1): 172–181. [Cao Xiaoyi, Ding Jianli, Ge Xiangyu, et al. Estimation of soil conductivity based on spectral simulation of different satellites[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(1): 172–181.]

[21] 赵明亮, 李艳红, 王盼盼, 等. 艾比湖湿地湖周典型植物群落下土壤沙化盐化特征研究[J]. 干旱环境监测, 2015, 29(4): 145–151. [Zhao Mingliang, Li Yanhong, Wang Panpan, et al. Researching on characteristics of soil salinization and desertification in Ebinur Lake wetland around the lake under the typical plant community[J]. Arid Environmental Monitoring, 2015, 29(4): 145–151.]

[22] 张瑜斌, 邓爱英, 庄铁诚, 等. 潮间带土壤盐度与电导率的关系[J]. 生态环境, 2003, 12(2): 164–165. [Zhang Yubin, Deng Aiying, Zhuang Tiecheng, et al. Relation between soil salinity in intertidal zone and electric conductivity[J]. Ecology and Environment, 2003, 12(2): 164–165.]

[23] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术[M]. 北京: 农业出版社, 1992: 144–145. [National Soil Census Office. Soil census technology in China[M]. Beijing: Agriculture Press, 1992: 144–145.]

[24] Coşkun M, Polat Ö, Coşkun F M, et al. The electrical modulus and other dielectric properties by the impedance spectroscopy of $LaCrO_3$ and $LaCr_{0.90}Ir_{0.10}O_3$ perovskites[J]. RSC Advances, 2018, 8 (9): 4634–4648.

[25] Liaw A, Wiener M. Classification and regression by randomforest [J]. R news, 2002, 2(3): 18–22.

[26] 包青岭, 丁建丽, 王敬哲, 等. 基于随机森林算法的土壤有机质含量高光谱检测[J]. 干旱区地理, 2019, 42(6): 1404–1414. [Bao Qingling, Ding Jianli, Wang Jingzhe, et al. Hyperspectral detection of soil organic matter content based on Random forest algorithm[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(6): 1404–1414.]

[27] Menze B H, Kelm B M, Masuch R, et al. A comparison of Random forest and its Gini importance with standard chemometric methods for the feature selection and classification of spectral data[J]. BMC Bioinformatics, 2009, 10: 213, doi: 10.1186/1471-2105-10-213.

[28] Bellon-Maurel V, Fernandez-Ahumada E, Palagos B, et al. Critical review of chemometric indicators commonly used for assessing the quality of the prediction of soil attributes by NIR spectroscopy[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2010, 29(9): 1073–1081.

[29] 赵贵章, 徐远志, 乔翠平, 等. 介质含水量与介电常数模型影响因素分析[J]. 工程勘察, 2018, 46(7): 55–61. [Zhao Guizhang, Xu Yuanzhi, Qiao Cuiping, et al. Factor analysis on model of relations between water content and dielectric constant[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2018, 46(7): 55–61.]

[30] 胡庆荣. 含水含盐土壤介电特性实验研究及对雷达图像的响应分析[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2003. [Hu Qingrong. Studies on microwave dielectric behavior of moist salt soil and its effect on backscattering coefficients extracted from radar image[D]. Beijing: Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, 2003.]

[31] 丁艳玲, 刘宝江, 李洋洋. L波段对不同盐类土壤的微波介电特性分析[J]. 地球信息科学学报, 2012, 14(3): 376−381. [Ding Yanling, Liu Baojiang, Li Yangyang. Study on microwave dielectric properties of different salt soils at L-band[J]. Journal of Geo-information Science, 2012, 14(3): 376−381.]

[32] 李洋洋. 集成光学与微波遥感苏打盐碱地水盐含量反演方法研究[D]. 长春: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2014. [Li Yangyang. The reversal method study to moisture content and salinity of soda saline-alkaline soil by integrating optics and microwave remote sensing[D]. Changchun: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2014.]

[33] 宫燕, 刘宝江, 宋开山. 盐渍土土壤溶液1.43 GHz复介电常数计算模型的构建与检验[J]. 土壤与作物, 2020, 9(1): 83−93. [Gong Yan, Liu Baojiang, Song Kaishan. Construction and verification of the complex dielectric constant calculation model in saline soil solution at 1.43 GHz[J]. Soils and Crops, 2020, 9(1): 83−93.]

[34] Szypłowska A, Lewandowski A, Jones S B, et al. Impact of soil salinity, texture and measurement frequency on the relations between soil moisture and 20 MHz−3 GHz dielectric permittivity spectrum for soils of medium texture[J]. Journal of Hydrology, 2019, 579: 124−155.

[35] 熊文成, 邵芸. 氯化钠盐土壤介电虚部特性的初步研究[J]. 遥感学报, 2006, 2: 279−286. [Xiong Wencheng, Shao Yun. Model for imaginary part of dielectric constant of NaCl soil[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2006, 2: 279−286.]

[36] 潘金梅, 张立新, 吴浩然, 等. 土壤有机物质对土壤介电常数的影响[J]. 遥感学报, 2012, 16(1): 1−24. [Pan Jinmei, Zhang Lixin, Wu Haoran, et al. Effect of soil organic substance on soil dielectric constant[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2012, 16(1): 1−24.]

[37] 许景辉, 赵钟声, 王一琛, 等. 基于双线性理论的土壤介电测量研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 322−331. [Xu Jinghui, Zhao Zhongsheng, Wang Yichen, et al. Soil dielectric measurement based on bilinear theory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 322−331.]

[38] Hallikainen M T, Ulaby F T, Dobson M C, et al. Microwave dielectric behavior of wet soil part 1: Empirical models and experimental observations[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1985, GE−23(1): 25−34.

[39] Wu Y R, Wang W Z, Zhao S J, et al. Dielectric properties of saline soils and an improved dielectric model in C-band[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(1): 440−452.

[40] Mavrovic A, Pardo Lara R, Berg A, et al. Soil dielectric characterization during freeze-thaw transitions using L-band coaxial and soil moisture probes[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2021, 25(3): 1117−1131.

Response analysis and modeling of microwave dielectric properties of typical saline soil in Xinjiang

ZHAO Shuang[1,2,3], DING Jianli[1,2,3], HAN Lijing[1,2,3], HUANG Shuai[4], GE Xiangyu[1,2,3]

(1. College of Geography and Remote Sensing Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China; 3. Key Laboratory of Smart City and Environment Modelling of Higher Education Institute, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China; 4. College of Geography and Environment, Liaocheng University, Liaocheng 252000, Shandong, China)

Abstract: Soil salinization negatively affects regional economic and ecologically sustainable development. Due to the unique arid climate conditions in Xinjiang, China, there are many varieties of saline soils that are widely distributed across the region. Currently, researchers have proposed many models to describe the relationship between the dielectric constant of soil samples and the soil moisture content. However, it is still difficult to establish a model that describes the soil salt dielectric properties, which can also clarify the response relationship between dielectric constant and salt contents. In order to explore the influence of soil salinity on the dielectric properties of soil, two typical saline soil types (sulfate-chloride type, Na_2SO_4-NaCl; chloride-sulfate type, $NaCl-Na_2SO_4$) were used in this study. The dielectric constant of 240 soil samples was obtained at 500 discrete frequencies from 0.3 GHz to 20.0 GHz to analyze the effects of water content, salt content, salt type, and soil texture on the soil dielectric constant of soil (including the real part, ε'; imaginary part, ε''; the real part of the modulus, M'; the imaginary part of the modulus, M''). Random forest was used to develop salt estimation methods; this work permits us to evaluate the effectiveness of using the dielectric constant of soil in estimating the soil salt content. The Random forest method has been widely used in the research related to soil property prediction. The algorithms have the capacity to provide the relative importance of the variables used; this allows us to further explore the relationship between soil salt and dielectric constant. The obtained results were as follows: (1) Salt content has an effect on both the real and imaginary part of the complex dielectric constant of wet soil and dry silty loam. (2) There is a more significant difference between ε'' at a frequency of 0.3 GHz for the two moist saline soils of the same class ($\varepsilon''_{Na_2SO_4-NaCl} > \varepsilon''_{NaCl-Na_2SO_4}$). (3) The results of machine learning indicate that the imaginary part of the modulus (M'') is more closely related to the salt content and 0.3−5.0 GHz is the most important frequency range for such predictions. This research indicates that the soil salinity estimation method combined with soil dielectric characteristic analysis experiments and machine learning can effectively establish the most important dielectric constants and frequency ranges. In conclusion, the results presented here provide a scientific background for the microwave remote sensing monitoring of soil salinization on the complex underlying surface.

Key words: microwave dielectric constant; soil salinity; machine learning; mircrowawe remote sensing